



## VARIABILIDAD EXTREMA DEL ENSO DURANTE EL MIS 5E EVIDENCIADA POR REGISTROS ISOTOPICOS EN MOLUSCOS FOSILES DEL SUR DEL PERU

Rolf Rivas <sup>1</sup>, Matthieu Carré <sup>1</sup>, Kathy Cordova <sup>1</sup>, Ernesto Fernández <sup>2</sup>, Cristiano M. Chiessi <sup>3</sup>, Diana Ochoa <sup>1</sup>, Rodolfo Salas <sup>1</sup>, Jorge Cardich <sup>4</sup>, Alexander Pérez <sup>1</sup>, Dimitri Gutiérrez <sup>4</sup>

### Resumen

La evaluación del rango de variabilidad natural del ENSO requiere reconstrucciones del Paleo-ENSO en un amplio rango de climas en el pasado. Durante el último periodo interglacial, hace 130-116 mil años, la tierra experimentó un clima más cálido que el periodo actual en respuesta a un fuerte forzamiento orbital. Este periodo ofrece una oportunidad para explorar el comportamiento del ENSO bajo diferentes condiciones climáticas promedio. Nosotros presentamos aquí una cuantitativa estimación de la variabilidad del ENSO durante el MIS 5e en la costa sur del Perú, una región donde la influencia del ENSO influye más que en todo el mundo. La variabilidad estacional a interanual de la temperatura superficial del mar (TSM) fue reconstruida de registros isotópicos de oxígeno ( $\delta^{18}\text{O}$ ) a resolución mensual en 10 conchas de moluscos fósiles bien preservadas (acumulan 30 años) de una terraza marina. La variación de  $\delta^{18}\text{O}$  de las conchas son sólo determinadas por cambio de la TSM en esta región hiper árida. Nuestros resultados fueron comparados a reconstrucciones modernas y del Holoceno que usaron conchas de la misma especie y de la misma área. Nosotros encontramos que la amplitud del ciclo anual de la TSM fue 25 % y 40 % mayor comparado a la actualidad y el Holoceno, respectivamente. La variabilidad del ENSO, fue estimada como la desviación estándar de las anomalías del rango estacional de la TSM, fue 110 % y 140 % mayor en la muestra del MIS 5e comparado a las muestras modernas y del Holoceno, respectivamente. La asimetría de las

anomalías del ENSO en el MIS 5e fue mayor que en la actualidad debido a eventos muy fuertes El Niño, sugiriendo una prevalencia del modo ENSO en el Pacífico Este en ese periodo. El resultado apoya una relación positiva entre la amplitud del ciclo anual y la amplitud de la variabilidad del ENSO. Este registro paleoclimático muestra que la variabilidad del ENSO puede potencialmente ser dos veces más fuertes que en la actualidad, un nivel de actividad que hasta ahora se desconocía en el Pacífico Tropical Este.

### Abstrac

Assessing the full range of natural ENSO variability requires paleo-ENSO reconstructions in a wide range of past climates. During the last interglacial period, 130 to 116 thousand years ago, the Earth experienced warmer climate in response to a strong orbital forcing. This period offers an opportunity to explore ENSO behaviour under different mean climate conditions. We present here a quantitative estimate of ENSO variability during MIS5e in coastal Peru, a region where ENSO influence is among the highest in the world. Seasonal to interannual variability of sea surface temperature (SST) was reconstructed from monthly-resolved oxygen isotope records ( $\delta^{18}\text{O}$ ) in 10 well preserved fossil mollusk shells (cumulating ~30 years) from an uplifted marine terrace. Shell  $\delta^{18}\text{O}$  variations are only determined by SST changes in this hyperarid region. Results are compared to modern and Holocene reconstructions using shells of the same species from the same area. We find that the amplitude of the annual cycle of SST was ~25% and 40%

larger compared to today and the Holocene, respectively. ENSO variability, estimated as the standard deviation of seasonal range anomalies, was 110% and 140% larger in the MIS5e sample compared to the modern and the Holocene sample respectively. The skewness of ENSO anomalies in the MIS5e was larger than today due to very strong El Niño events, suggesting a prevalence of the Eastern Pacific ENSO mode in that period. The result supports a positive relationship between the amplitude of the annual cycle and the amplitude of ENSO variability. This paleoclimate record shows that ENSO variability can potentially be twice as strong as today, a level of activity that was unknown so far in the Eastern Tropical Pacific.

Materiales y métodos

### Área de estudio

Se recolectaron conchas fósiles del bivalvo *Mesodesma donacium* de la terraza marina Pampa del Palo, Ilo, Moquegua, Perú (Figura 1). La costa de Ilo es muy sensible a los eventos El Niño que conducen a un incremento de la TSM. El área se ubica entre los ríos Ilo (2,78 m<sup>3</sup> / s) y Locumba (2,67 m<sup>3</sup> / s) a unos 8 y 40 km respectivamente y sus caudales permanecen muy pequeños durante todo el año, incluso durante los eventos ENSO, por lo que la composición isotópica del agua de mar no puede verse afectada por la entrada de agua dulce.

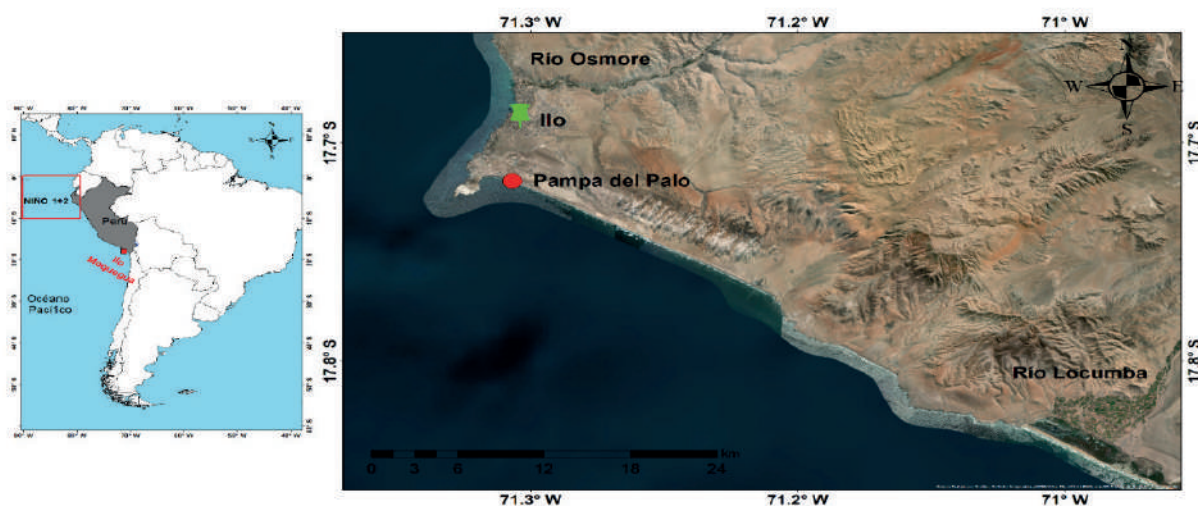


Figura 1. Área de estudio: Pampa del Palo, Ilo, Moquegua, Perú.

### Estratigrafía isotópica

Se reconstruyó la estratigrafía isotópica  $\delta^{18}\text{O}$  a partir de 10 fragmentos de *M. donacium* de diferentes individuos obtenidos por nivel de la terraza Pampa del Palo. Las conchas fueron muestreadas y la estratigrafía de la terraza desarrollada por Córdova, 2020. El  $\delta^{18}\text{O}$  teórico de *M. donacium* se calculó a partir de la ecuación de paleotemperatura y registros de  $\delta^{18}\text{O}$  de foraminíferos (Mix et al., 1995) y de TSM del Pacífico ecuatorial oriental (Lawrence et al., 2006)

### Reconstrucción de la variabilidad de la TSM y el ENSO

Las anomalías de la TSM relacionadas con ENSO se reconstruyeron mediante los registros mensuales de  $\delta^{18}\text{O}$  en conchas fósiles de *M.*

*donacium*. Se recolectó 10 individuos *M. donacium* de depósitos costeros del MIS 5e de la terraza marina. La extrema aridez de la costa permitió en una buena conservación de las conchas. Se usó la siguiente ecuación calibrada para *M. donacium* para calcular la paleotemperatura y amplitud de la estacionalidad de la TSM ( $\Delta\text{TSM}$ ):

$$T (^{\circ}\text{C}) = (17.41 \pm 1.15) - (3.66 \pm 0.16) * (\delta^{18}\text{O}_{\text{arag./PDB}} - \delta^{18}\text{O}_{\text{wat./SMOW}})$$

La variabilidad de la  $\Delta\text{TSM}$  es indicador de la actividad de ENSO y la asimetría de la  $\Delta\text{TSM}$  indica si fue por eventos El Niño o La Niña (Carre et al., 2013). Los resultados fueron comparados a reconstrucciones actuales y del Holoceno que

usaron *M. donacium* de la misma área.

## Resultados y discusión

### Estratigrafía isotópica

Los registros  $\delta^{18}\text{O}$  de la unidad V (min=0.72 ‰, max=1.18 ‰, rango=0.46 ‰) fueron menores que los registros de la base de la unidad II (min=0.99 ‰, max=1.26 ‰, rango=0.27 ‰) (Figura 2B). En la curva isotópica marina calculada los valores de  $\delta^{18}\text{O}$  (min=0.56 ‰, max=1.05 ‰) entre 116-130 ka (MIS5e) fueron también menores que las registradas (min=0.79 ‰, max=1.54 ‰) entre 191-243 ka (MIS 7) (Figura 2C). Los valores mínimos

fueron similares, aunque ligeramente mayores que los mínimos del MIS5 e y MIS 7 en la curva isotópica marina. La estratigrafía isotópica de la terraza confirma la presencia de dos interglaciales como lo propuso Ortlieb et al. (1996). Los valores más negativos del interglacial más elevado son consistentes con el estadio MIS5e en la unidad V y el estadio MIS 7 en la unidad II. Proponemos en base a esas observaciones una correlación entre la estratigrafía de la terraza y el testigo 846 (Figura 2). La unidad III correspondería al periodo glacial MIS 6 por la presencia de estructuras de barrera de arena y evaporitas asociadas a lagunas marinas y a un bajo nivel del mar.

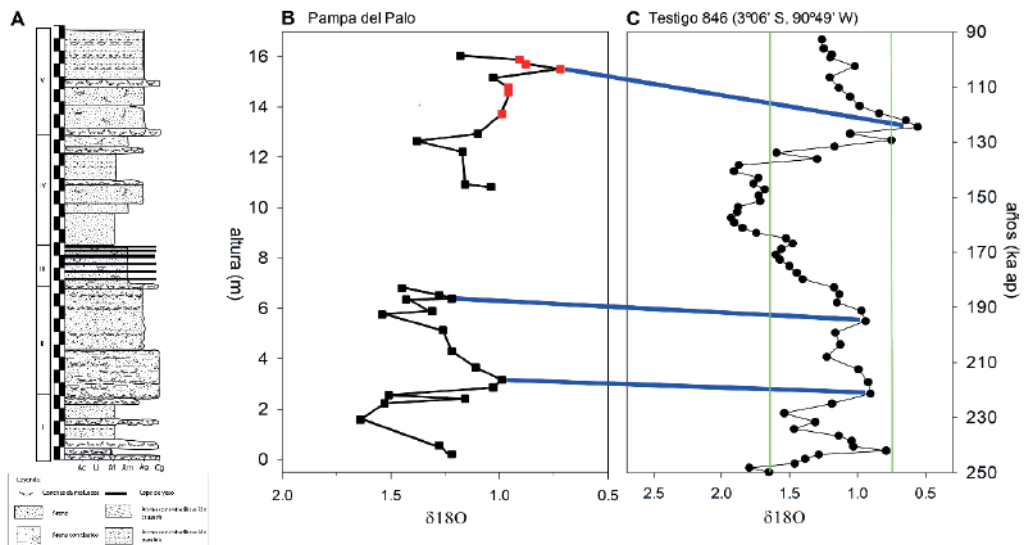


Figura 2. (A) Estratigrafía de la terraza marina Pampa el Palo (Cordova, 2020). Los números I, II, III, IV y V son las unidades marinas de la terraza. (B) Valores de  $\delta^{18}\text{O}$  medidas en conchas de *M. donacium*. Los cuadrados rojos indican los niveles de donde se colectaron las conchas de *M. donacium* para la reconstrucción paleoclimática. (C) valores teóricos  $\delta^{18}\text{O}$  de *M. donacium* calculados a partir de las anomalías de  $\delta^{18}\text{O}$  en foraminíferos bentónicos y valores de TSM del testigo 846 (3° S, 91° W) (Lawrence et al., 2006; Mix et al., 1995). Las líneas verdes representan el rango de valores de  $\delta^{18}\text{O}$  medidos en la terraza. Las líneas azules representan las correlaciones tentativas entre los picos de  $\delta^{18}\text{O}$  de la estratigrafía de la terraza con la estratigrafía isotópica.

### Variabilidad de la TSM y el ENSO en el MIS 5e

La mediana de  $\Delta\text{TSM}$  para el MIS 5e (3.8 °C) fue mayor en 25 % en comparación con el periodo actual (2.85 °C) y 40% en comparación al Holoceno (2.28 °C) (Figura 3A). La varianza (3.16 °C<sup>2</sup>) de la  $\Delta\text{TSM}$  fue 5 veces mayor comparado a las registradas por conchas de la misma especie en el Holoceno (0.63 °C<sup>2</sup>) y 4.4 veces mayor comparado al periodo actual (0.72 °C<sup>2</sup>) (Figura 3B). Nuestro resultado indica entonces una estacionalidad de la TSM y variabilidad de ENSO mucho mayor que durante el Holoceno y periodo actual. El valor de asimetría (0.47) de la  $\Delta\text{TSM}$  registrado es positivo y

mayor comparado en el Holoceno (0.40) y periodo actual (0.32) (Figura 3C). Este resultado implica una mayor frecuencia de eventos de tipo “Pacífico este”. Nuestro resultado no es consistente con los cambios detectados en los registros de ENSO en Indonesia (Hughen et al., 1999) y Papua Nueva Guinea (Tudhope et al., 2001) en el MIS 5e. La diferencia de actividad de ENSO entre nuestro registro y el Pacífico occidental se puede deber a cambios en el patrón espacial de ENSO como se hipotetizo en el Holoceno (Carré et al., 2014).

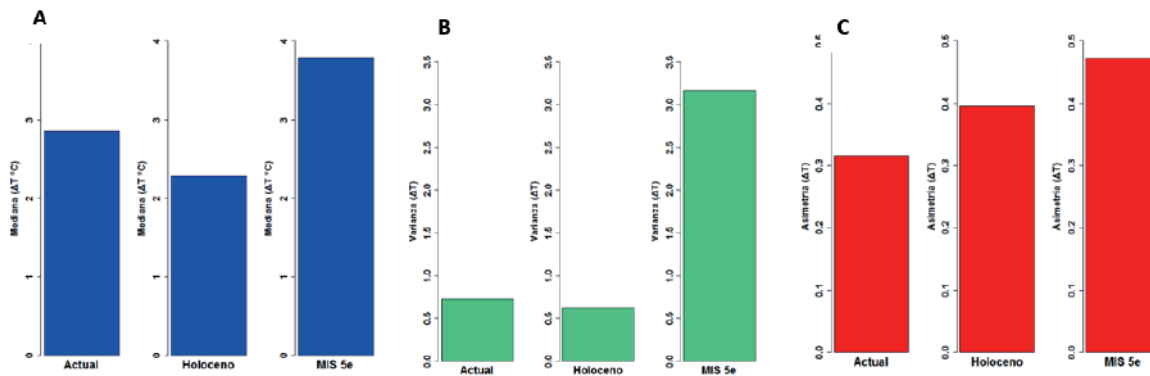


Figura 3. (A) Mediana, (B) varianza y (C) asimetría  $\Delta TSM$  para la actualidad, Holoceno y MIS 5e.

## Conclusiones

El ciclo estacional de la temperatura superficial del mar en el MIS 5e fue mayor que el Holoceno en 40 % y que la actualidad en 25 %. Mientras que la variabilidad interanual fue de un nivel extremo hasta más de dos veces mayor en el MIS 5e en comparación con el Holoceno y periodo actual. La asimetría de la  $\Delta TSM$  en el MIS 5e fue mayor que en el Holoceno y que el periodo actual, sugiriendo que el principal modo de variabilidad del ENSO fue de tipo “Pacífico este”.

## Contribuciones técnicas y científicas

El rango de variabilidad de ENSO es mucho más amplio de lo que se ha observado en los registros instrumentales o paleoclimáticos recientes, abriendo así la posibilidad de cambios futuros de ENSO de una amplitud inesperada.

## Referencias bibliográficas

- Carré, M., Sachs, J. P., Schauer, A. J., Rodríguez, W. E., Ramos, F. C. (2013). Reconstructing El Niño-Southern Oscillation activity and ocean temperature seasonality from short-lived marine mollusk shells from Peru. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 371, 45–53.
- Carré, M., Sachs, J. P., Purca, S., Andrew, J., Braconnot, P., & Falcón, R. A. (2014). Holocene history of ENSO variance and asymmetry in the eastern tropical Pacific. *Science*, 345, 1045-1048.
- Córdova, K. (2020). Caracterización de la malacofauna de la terraza marina Pampa del Palo como indicador de las variaciones

ambientales costeras del área de Ilo en el último interglaciar. Tesis en preparación para optar el grado de biólogo. Universidad Nacional Mayor de San Marcos.

- Hughen, K. A., Schrag, D. P., Jacobsen, S. B., Hantoro, W. (1999). El Niño during the last interglacial period recorded by a fossil coral from Indonesia. *Geophysical Research Letters*, 26, 3129-3132.
- Ortlieb, L., Zazo, C., Goy, J. L., Dabrio, C., Macharé, J. (1996). Pampa del Palo: an Anomalous Composite Marine Terrace On The Uprising Coast Of Southern Peru. *Journal of South American Earth Sciences*, 367–379.
- Tudhope, A. W., Chilcott, C.P., McCulloch, M.T., Cook, E.R., Chappell, J., Ellam, R.M., Lea, D.W., Lough, J.M., Shimmield, G.B. (2001). Variability in the El Niño-Southern Oscillation Through a Glacial-Interglacial Cycle. *Science*, 291, 1511–1517.